

淮河流域皖西大别山区地形因子与水系结构 关联性分析

史书汇¹, 王晓云², 李发文¹

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘要:为深入研究淮河流域皖西大别山区地形因子与水系结构的量化关系,基于 ArcGIS 对研究区地形因子及水系结构特征参数进行计算与提取,采用多元线性回归方法分析了地形因子与水系结构特征参数之间的关系,得到了针对细度比、河道维系常数、分形维数、平均长度比和流域圆度的5个定量预测模型,并利用全局空间自相关及空间冷热点分析对水系格局及地形特征的空间分布进行了研究。结果表明:研究区地形因子与水系结构特征参数在空间上普遍存在相关关系,相关系数 r 最高达0.84;5个定量预测模型显著性水平 P 值均小于0.05,方差膨胀因子均小于10,模型拟合优度较高;研究区水系结构特征参数和地形因子存在“北冷南热”和“北热南冷”的显著空间分异特征。

关键词:地形因子;水系结构特征参数;多元线性回归;全局空间自相关;冷热点分析;淮河流域

中图分类号:TV213

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)01-0117-10

Analysis of correlation between watershed topographic factors and river system structure in Dabie Mountains in western Anhui Province of the Huaihe River Basin //SHI Shuhui¹, WANG Xiaoyun², LI Fawen¹ (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to deeply study the quantitative relationship between topographic factors and river system structure in the Dabie Mountains in western Anhui Province of the Huaihe River Basin, based on ArcGIS, the topographic factors and characteristic parameters of river system structure in the study area were calculated and extracted. The relationship between topographic factors and river system structure characteristic parameters was analyzed using multiple linear regression method, and five quantitative prediction models were obtained for fineness ratio, river maintenance constant, fractal dimension, average length ratio, and watershed roundness. And the spatial distribution of river system patterns and topographic features was studied using global spatial autocorrelation and spatial cold and hot spot analysis. The results show that there is a general spatial correlation between the topographic factors and the river system structure in the study area, with a maximum correlation coefficient r of 0.84. The significance level P -values of the five quantitative prediction models are all less than 0.05, and the variance inflation factor is all less than 10, indicating a high degree of goodness of fit for the models. It is found that there are significant spatial differentiation characteristics of “cold in the north and hot in the south” and “hot in the north and cold in the south” in the characteristic parameters of river system structure and topographic factors of the study area.

Key words: topographic factor; river system structure characteristic parameter; multiple linear regression; global spatial autocorrelation; cold and hot spot analysis; Huaihe River Basin

河流水系是宝贵的自然资源,同时也是其他自然资源和生态环境的重要载体,水资源的循环为人们的生产和生活提供基本的物质保障。地形作为关键的自然地理要素,直接对地球表面的物质流通和能源转换产生深远影响^[1]。流域水文过程与地形

地貌的耦合作用普遍存在于自然界中,探究地形地貌与河流水系格局相互作用的定量关系是当今水文科学的前沿热点问题。20世纪60年代以来,国内外学者在探寻河流水系和地形地貌之间的关系及基于数字高程模型的特征因子提取等方面开展了大量

基金项目:国家自然科学基金项目(52239004,52179020)

作者简介:史书汇(2000—),男,硕士研究生,主要从事水文过程研究。E-mail:shishuhui372@163.com

通信作者:李发文(1976—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:lifawen@tju.edu.cn

研究。例如,冯孝芳等^[2]对流域水文和地形特性的关系进行了综述和展望,论述了利用统计学及物理学方法建立两者之间定量关系的思路,具有深刻的指导意义;Kramer 等^[3]对河网的演化过程及演变原因进行了阐述;Jenson 等^[4]对基于规则栅格提取地貌特征的方法进行了分析;闫国年等^[5]综述了利用数字高程模型提取地形地貌参数的技术方法,并从地貌学的视角出发,给出了一种新的地貌类型划分方法;黄诗峰等^[6]运用 GIS 技术提取河流密度,分析和讨论了河流密度与洪灾风险的关系;张冬冬等^[7]分析了荆江河段河道地形改变后洞庭湖水文情势的变化及其对荆江河段的反馈作用;钟子悦等^[8]结合实测水文资料与河网一维水动力模型,揭示了径流及地形变化条件下珠江三角洲河网内潮汐动力的演变过程。空间自相关在自然科学中的应用多集中在土地利用结构分析、景观空间格局演变以及水资源空间格局分析等方面^[9-11],其中冷热点分析多用于环境污染分布研究及生态用地空间格局分析^[12-13]。目前,国内外对数字水网及地形因子的提取发展较为成熟,具有一定的理论及试验基础,但针对地形地貌因子与水系结构特征参数之间的定量研究尚不充分。

加快构建国家水网是推进新时期水利高质量发展的重要举措,而国家水网建设需以自然河湖水系为基础,以资源环境承载能力为约束^[14-15]。本文基于淮河流域皖西大别山区的数字高程模型,开展数字水系提取与地形因子计算,探索流域水系分布特征及其与地形因子之间相关性和定量关系,分析地形因子及水系结构空间分布特征,以期为淮河流域水网建设及区域土地利用结构调整提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

皖西大别山区位于淮河以南,处于安徽、河南、湖北 3 省交汇处,涉及 2 市 11 县区,面积约 1.27 万 km²。皖西大别山区位于北纬 30°10′~32°30′,东经 115°26′~116°65′,属湿润季风气候类型。皖西大别山区内的 3 条主要河流汲河、史河、淠河由南向北分别汇入淮河。皖西大别山区多年平均降水量为 1216.7 mm,年平均降水日为 112~125.6 d,年平均降雪日为 10~12 d,年平均相对湿度为 79%。淮河流域皖西大别山区作为我国社会文化和自然地理的分界线,起着连接南北的过渡作用^[16]。通过 ArcGIS 的水文分析将淮河流域皖西大别山区的汲河、淠河、史河 3 个流域进一步划分,从中选取 19 个子流域作为研究区,具体情况如图 1

所示。

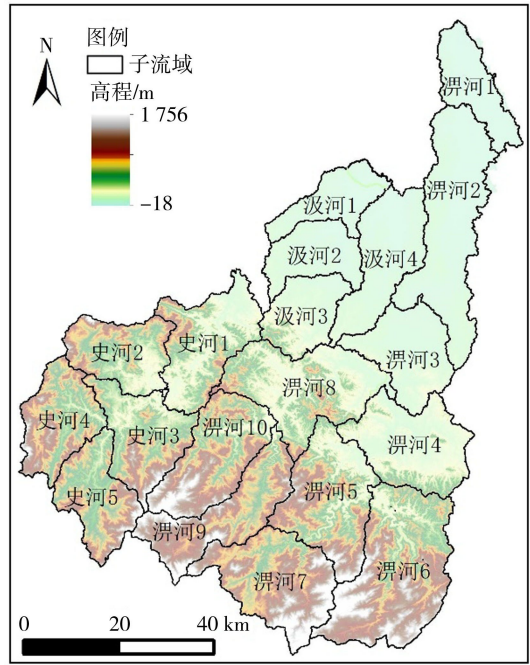


图 1 研究区子流域划分

Fig.1 Subbasin division of study area

1.2 数据来源

与传统地形图相比,数字高程模型(digital elevation model, DEM)可以是多维度的,精度不易损失;同时,采用数字形式储存及显示地理信息,试验效率高,有利于定量分析。本文选取 ALOS DEM 进行研究,该数据水平及垂直精度可达 12 m,空间分辨率为 12.5 m。水利工程数据来自安徽水信息网(<http://yc.wswj.net/ahsxx/lol/public/public.html>)及淮河水利网(<http://www.hrc.gov.cn/>),部分数据及河流资料由安徽沃特水务科技有限公司提供。

2 研究方法

2.1 地形因子及水系结构特征参数提取

地形因子的提取和分析是探求流域地貌形态、土壤侵蚀机理及水土保持的前提基础^[17]。本文选取了具有代表性的 14 个地形因子,并根据这些因子描述的空间范围将其分为微观地形因子和宏观地形因子两种基本类型。微观地形因子包括坡度^[18]、坡向、曲率、坡度变率、坡向变率^[19]、剖面曲率及平面曲率;宏观地形因子包括地形起伏度^[20-21]、地面粗糙度、高程变异系数、地表切割深度^[22]、坡度因子^[23]、坡长因子及坡度坡长因子。通过对这些因子进行综合分析来了解流域内地形对水文过程、水系结构和土壤侵蚀的影响。

基于研究区 DEM,利用 ArcGIS 进行洼地填充、

流向分析、汇流分析、河网分析及水系分级提取研究区的数字水系。在水系提取精度层面,以 5 000 为间隔调整栅格汇流阈值,分析数字水系的密度,并与研究区实际卫星影像图(影像级别为 18 级,分辨率为 0.45 m/像素)及河流分布图叠加,使数字水网与实际水系达到最佳的吻合度,最终确定汇流阈值为 45 000;同时对生成的伪沟谷进行合理消除,以得到更切合实际的数字水系。针对经过校正的数字水系,分析了 7 个结构特征参数,包括河网密度、平均分支比^[24]、平均长度比^[25]、分形维数、河道维系数、流域圆度^[26]和细度比^[27]。这些参数涵盖了水系的分布、流域发育程度、河道供水特性、地形侵蚀状况和泥沙输移能力等关键特征。通过对这些参数的计算和分析可以更全面地了解水系的形态结构、自相似性以及地形对环境的响应。

2.2 地形因子与水系结构关联性分析

a. 二元相关分析。二元相关分析是一种定量的事物关系分析方法,用于度量和描述两个变量之间的关系。Pearson 相关系数用来度量两个变量之间的线性相关程度,相关系数越大,相关程度就越强,本文利用其分析 7 个水系结构特征参数和 14 个地形因子的相关性,以筛选出显著相关的地形因子-水系结构特征参数组合,并进一步探究之间的定量关系。

b. 线性回归分析。线性回归分析用于分析不同客体间的统计关系,探讨各变量间的变化规律,并以回归方程的形式进行表达,线性回归可分为一元线性回归及多元线性回归。采用决定系数 R^2 对线性回归方程的拟合效果进行检验, R^2 越接近 1,拟合效果越好。本文对相关性显著的地形因子-水系结构特征参数组合进行一元线性回归及多元线性回归,量化二者之间的相关关系,以探求地形因子与水系结构之间的定量关系及耦合作用机制。

c. 空间自相关分析。空间自相关用于度量空间对象及相应的某一属性值在空间上的聚集程度,包括全局空间自相关及局部空间自相关。全局空间自相关依据莫兰指数 Moran's I 来分析整个研究对象与全域范围内的样本之间是否存在空间自相关;在标准差倍数 z 得分与概率 p 值显著的条件下,如果 Moran's I 指数值为正则指示聚集趋势,如果 Moran's I 指数值为负则指示离散趋势。本文采用 Moran's I 指数评价研究区地形地貌特征和水系格局的空间相关关系,判断其在整个地理空间上是否存在集聚效应。局部空间自相关能指出显著的集聚或离散的位置,相比全局自相关,可以更好地体现特

征因子在空间上的局部特征^[28]。本文研究局部空间聚类分布特征的方法采用冷热点分析,该方法用热点与冷点分别标志出变量空间集聚程度的高值区与低值区。Getis-Ord G^* 指数是刻画区域冷热点的常用指标,本研究基于 ArcGIS 10.7 采用 Getis-Ord G^* 指数对研究区地形因子及水系结构特征参数在局部的空间异质性进行测度。

3 结果与分析

3.1 地形因子及水系结构特征参数提取

利用 ArcGIS 10.7 对研究区 19 个子流域提取坡度、坡向、地面粗糙度等 14 个地形因子以及河网密度、分形维数、流域圆度等 7 个水系结构特征参数。为消除数据性质、尺度不同对结果的影响,采用均值化方法对以上参数进行标准化处理。地形因子及水系结构特征参数提取结果如图 2 所示。

3.2 地形因子与水系结构特征参数统计分析

3.2.1 相关性分析及显著性检验

对研究区 19 个子流域的 7 个水系结构特征参数及 14 个地形因子进行相关性分析,结果如表 1 所示。由表 1 可见,相关分析结果显示研究区地形特征与水系结构在空间上普遍存在相关关系,但对应到单一地形因子对水系结构参数的影响仍需进行回归分析。

3.2.2 一元线性回归分析

利用 SPSS26 对研究区相关性显著(显著性 P 值小于 0.05)的 20 组数据进行一元线性回归分析,结果如图 3 所示。由图 3 可见,研究区内河网密度与坡度、剖面曲率、地形起伏度、地面粗糙度及地表切割深度均呈正相关关系;平均长度比与地形起伏度、坡向及坡度变率均呈负相关关系;分形维数与坡度坡长因子呈正相关关系;河道维系数与地形起伏度、地面粗糙度及坡度因子均呈负相关关系;细度比与坡度、地形起伏度、地面粗糙度及地表切割深度均呈正相关关系;流域圆度与坡度、剖面曲率、地形起伏度及地面粗糙度均呈正相关关系。

由一元线性回归分析结果可知,细度与地面粗糙度的相关系数最高。一方面,地面粗糙度大的区域具有较好的耐蚀性能,具有较大的洼地区域和较高的储水量,有利于提高土壤水分的入渗,使土壤含水量增大,从而减小维持单位河长的集水面积;另一方面,随着粗糙程度的增加,加速了水流的侧向聚集,增加了地表径流的潜在冲刷能力,使细沟侵蚀更加容易发生,故在研究区南部地面粗糙度大的地区沟壑纵横,河网密集,河道总长度越大。整体来看,除细度比外,其余水系结构特征参数均与地形因

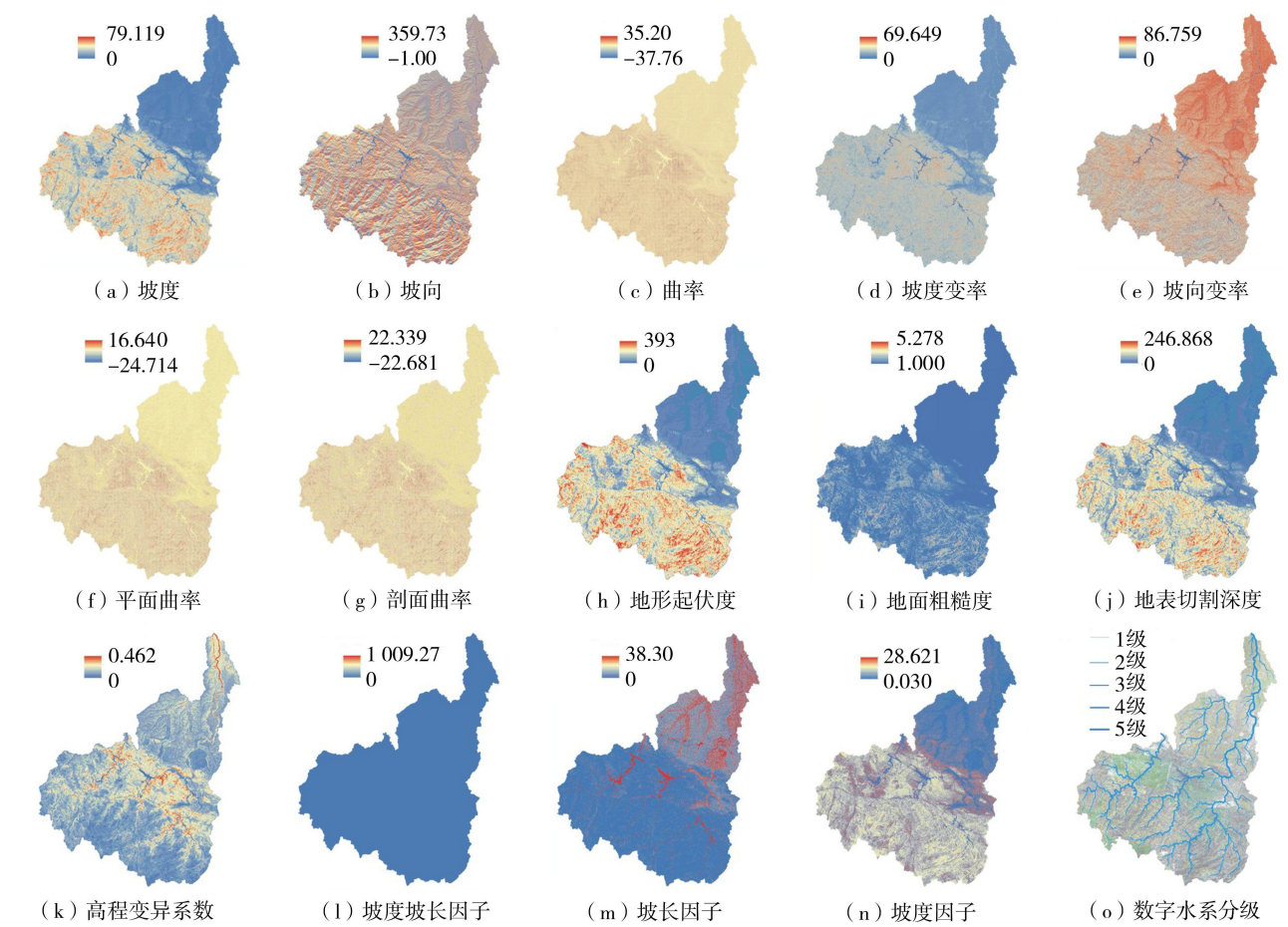


图 2 研究区地形因子及水系结构特征参数

Fig.2 Characteristic topographic factors and parameters of river system structure in study area

表 1 研究区地形因子与水系结构特征参数相关系数

Table 1 Correlation index of topographic factors and characteristic parameters of river system structure in study area							
水系结构特征参数	地形起伏度	地面粗糙度	地表切割深度	高程变异系数	坡度坡长因子	坡长因子	坡度因子
河网密度	0.50	0.51	0.50	0.150	0.150	-0.45	0.54
平均分支比	-0.42	-0.43	-0.42	0.034	-0.200	0.36	-0.37
平均长度比	-0.47	-0.45	-0.46	-0.270	-0.120	0.44	-0.49
分形维数	-0.15	-0.15	-0.15	0.330	0.540	0.27	-0.19
河道维系常数	-0.49	-0.50	-0.49	-0.130	-0.140	0.44	-0.54
细度比	0.79	0.81	0.78	0.022	-0.064	-0.76	0.79
流域圆度	0.59	0.59	0.59	-0.061	-0.310	-0.63	0.63
水系结构特征参数	坡度	坡向	曲率	坡度变率	坡向变率	平面曲率	剖面曲率
河网密度	0.52	0.46	-0.056	0.56	-0.51	0.48	0.51
平均分支比	-0.42	-0.35	0.29	-0.41	0.43	-0.38	-0.35
平均长度比	-0.48	-0.50	0.14	-0.50	0.48	-0.54	-0.48
分形维数	-0.15	-0.11	0.011	-0.13	0.18	-0.058	-0.20
河道维系常数	-0.51	-0.45	0.051	-0.55	0.50	-0.46	-0.50
细度比	0.81	0.71	-0.44	0.84	-0.79	0.81	0.79
流域圆度	0.61	0.53	-0.059	0.63	-0.61	0.59	0.61

子呈弱相关关系(相关系数小于0.50)。一方面,水系结构特征参数是流域多种因素综合影响的结果,除受到地形因子影响外,还受土壤、气候、植被、人类活动等的作用;另一方面,水系结构特征参数不仅受单一地形因子影响,而受到多个解释变量的共同作用,需进行多元回归分析。

3.2.3 多元线性回归分析

采用多元线性回归分析研究多个地形因子共同影响单个水系结构特征参数的定量关系,筛选出通过显著性检验且拟合优度良好的模型,表达式见式(1)~(5),每个模型的P值都小于0.05,表明这5个模型在统计学上都具有很好的显著性。各模型

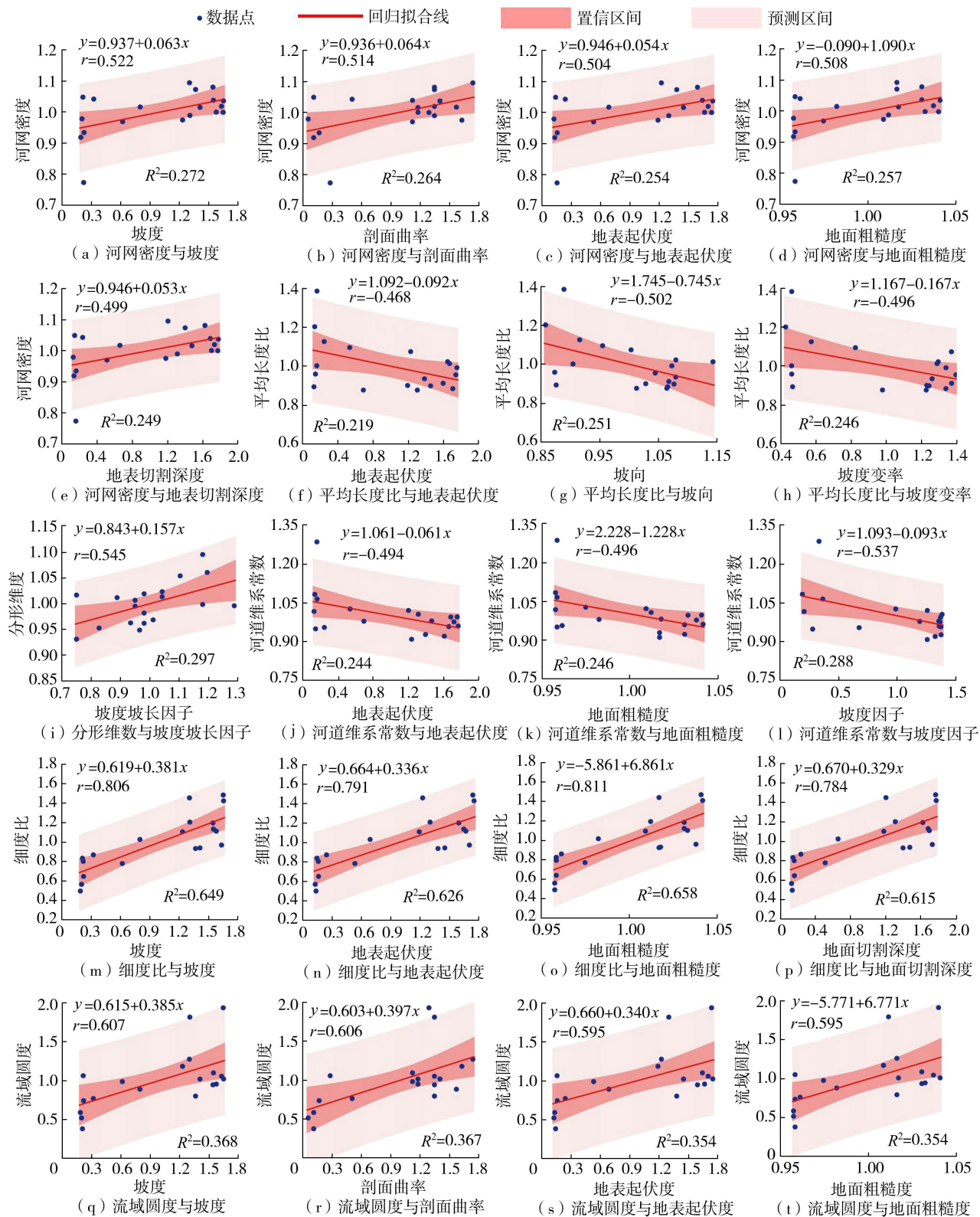


图3 一元线性回归分析结果

Fig.3 Results of univariate linear regression analysis

的 R^2 值分别为 0.761、0.331、0.335、0.335、0.490，说明自变量可以较好地解释因变量的变化情况。每个模型的方差膨胀因子值均小于 10，表明这些模型在建立时没有严重的多重共线性问题。模型结果展示了不同地形因子对于细度比、河道维系数、分形

维数、平均长度比和流域圆度的影响程度，并提供了定量预测的能力。这些结果有助于深入了解和解释水系结构与地形特征之间的关系。

$$S_f = -5.322 + 8.056 S_r + 0.268 C_p - 2.002 S_a \quad (1)$$

$$C = 0.762 - 0.212S_v + 0.450S_a \quad (2)$$

$$F_d = 1.082 - 0.244S_r + 0.162L_s \quad (3)$$

$$R_w = 3.279 - 2.067S_r - 0.212H_c \quad (4)$$

$$R_c = -4.110 + 0.066C_c + 5.957S_r - 0.913L_s \quad (5)$$

式中： S_r 为细度比； S_r 为地面粗糙度； C_p 为剖面曲率； S_a 为坡向； C 为河道维系常数； S_v 为坡度变率； L_s 为坡度坡长因子； F_d 为分形维数； R_w 为平均长度比； H_c 为高程变异系数； R_c 为流域圆度； C_c 为平面曲率。

a. 细度比受地面粗糙度、剖面曲率及坡向的共同影响。对于不同坡向的地形,由于气流的动力及热力作用,造成迎风坡和背风坡之间降水空间的差异,此外由于岩层倾向是顺坡向发育,倾角越大,边坡的稳定性越差,越容易形成崩塌、滑坡等地质灾害。剖面曲率描述了地形坡度的变化,影响着地表物质运动的加速或减速、沉积和流动状态。而地面粗糙度对坡面侵蚀过程及泥沙分选搬运过程具有一定的影响,即地面粗糙度在一定程度上能够延缓坡面产流的发生,明显降低径流率、产沙率及含沙量。结合回归模型,剖面曲率及地面粗糙度可在泥沙输移层面对细度比进行定量预测。

b. 河道维系常数受坡度变率及坡向的共同影响。根据牛全福等^[29]的研究,坡度变率增大会对地质灾害发生产生正反馈作用。坡向对坡面侵蚀强度有很大的影响,坡向的差异会导致坡面上热量、水分的差异,进而影响流域的汇流过程。河道维系常数作为流域结构特征的重要指标,与河网密度关系密切,可以综合表现流域对径流的调节能力。结合回归模型,坡度变率及坡向可以在汇流层面对河道维系常数进行定量预测。

c. 分形维数受地面粗糙度、坡度坡长因子的共同影响。水系的分形主要反映水系的发育程度,代表水系所处流域的地貌侵蚀发育阶段^[30]。坡度坡长因子作为重要的土壤侵蚀参数,对侵蚀过程的定量分析具有重要意义。在降雨强度较小时,随着坡长的增加,水流沿途渗透损失增大,发生沿程退化,对水系发育不利。随着坡度的增加,土粒的内摩擦角减小,坡面物质的静止稳定性降低,水流动能随之增加,导致冲刷加剧,加速水系发育。地面粗糙度是流域地貌侵蚀的影响因素,结合回归模型,地面粗糙度及坡度坡长因子可在水系发育层面对分形维数进行定量预测。

d. 平均长度比受地面粗糙度及高程变异系数的共同影响。平均长度比与侵蚀模数之间存在显著的相关关系^[25],地面粗糙度大小显著影响细沟侵蚀的程度,欧阳晓^[31]的研究发现高程变异系数对于流

域内的侵蚀切割情况有很好的反映。结合回归模型,地面粗糙度及高程变异系数可在流域侵蚀切割层面对平均长度比进行定量预测。

e. 流域圆度受平面曲率、地面粗糙度及坡度坡长因子的共同影响。在地表越粗糙的地区,雨水径流分散越容易,越不易发生内涝风险^[32]。流域的平面曲率可以反映地表物质运动的会合及发散模式,对径流过程产生影响。降雨作为坡面土壤侵蚀动力的主要来源,坡度越大的表面径流流速越大;而对于一定的坡长,流速越大,水流运移时间越少,导致下渗减少,地表径流量增大,故坡度坡长因子也会在一定程度上对径流过程线产生影响。结合回归模型,平面曲率、地面粗糙度及坡度坡长因子可在影响径流过程线层面对流域圆度进行定量预测。

3.3 空间特征分析

3.3.1 全局空间自相关

表2为水系结构特征参数及地形因子全局空间自相关分析结果。由表2可见,研究区除曲率、高程变异系数及坡度坡长因子以外的地形因子Moran's I 指数值均大于0.5。河网密度、平均长度比、河道维系常数、细度比及流域圆度的Moran's I 指数值均大于0,且 z 值均大于1.65, p 值均小于0.05,通过显著性检验,表示这5个指标呈现出空间正相关聚集分布,且相关性较强。

表2 水系结构特征参数及地形因子全局空间自相关分析结果

指标	Moran's I 指数	方差	z 值	p 值
河网密度	0.218	0.012	2.479	0.013
平均分支比	-0.065	0.012	-0.086	0.931
平均长度比	0.406	0.014	3.969	<0.01
分形维数	0.005	0.016	0.487	0.626
河道维系常数	0.197	0.010	2.533	0.011
细度比	0.434	0.016	3.859	<0.01
流域圆度	0.305	0.017	2.772	<0.01
坡度	0.811	0.020	6.094	<0.001
坡向	0.823	0.020	6.245	<0.01
曲率	0.047	0.018	0.775	0.438
坡度变率	0.796	0.020	6.006	<0.01
坡向变率	0.814	0.020	6.131	<0.01
剖面曲率	0.669	0.020	5.165	<0.01
平面曲率	0.639	0.020	4.886	<0.01
地形起伏度	0.807	0.020	6.063	<0.01
地面粗糙度	0.766	0.020	5.773	<0.01
高程变异系数	0.152	0.019	1.522	0.128
地表切割深度	0.807	0.020	6.056	<0.01
坡度因子	0.814	0.020	6.207	<0.01
坡长因子	0.821	0.020	6.251	<0.01
坡度坡长因子	0.099	0.019	1.129	0.259

3.3.2 冷热点分析

进一步探求研究区内具备全局空间自相关的水系结构特征参数及地形因子在空间上的强弱变化规律。通过冷热点分析,计算水系结构特征参数及地形因子的 Getis-Ord G^* 指数。按照 G^* 指数值将研究区划分为热点区、次热点区、过渡区、次冷点区和冷点区 5 个等级,进而得到研究区各指标的冷热点空间分布,结果见图 4。

对于水系结构特征参数,河网密度冷热点均呈片状分布,冷点区分布在研究区北部汲河流域;热点区普遍分布在研究区南部潞河 4、潞河 5 及潞河 9 流域,表明南部流域河流密集,水系发育程度较高。平均长度比冷热点区均呈团块状分布,冷点区出现

在研究区南部的史河流域,热点区分布在研究区北部汲河流域,结合袁雯等^[33]的研究成果,处于北部的热点区单位面积槽蓄容量和单位面积可调蓄容量较大。河道维系常数冷热点分布与河网密度相反,在空间上呈现出“北热南冷”的分布格局,表明南部流域表示该流域河道给养面积较小,较为湿润。细度比呈现出由北至南逐渐从冷点区向热点区过度的趋势,其中冷点区集中在汲河流域与潞河 1、2、3 流域,热点区以团块状分布于潞河 5、潞河 9 及潞河 10 流域,结合何隆华等^[34]的研究成果,处于热点区水系的流域地貌处于侵蚀发育的幼年期。流域圆度冷热点区均呈条带状分布,冷点区主要分布于潞河 1、2、3 与汲河 4 流域;热点区分布于南部史河 1 与史

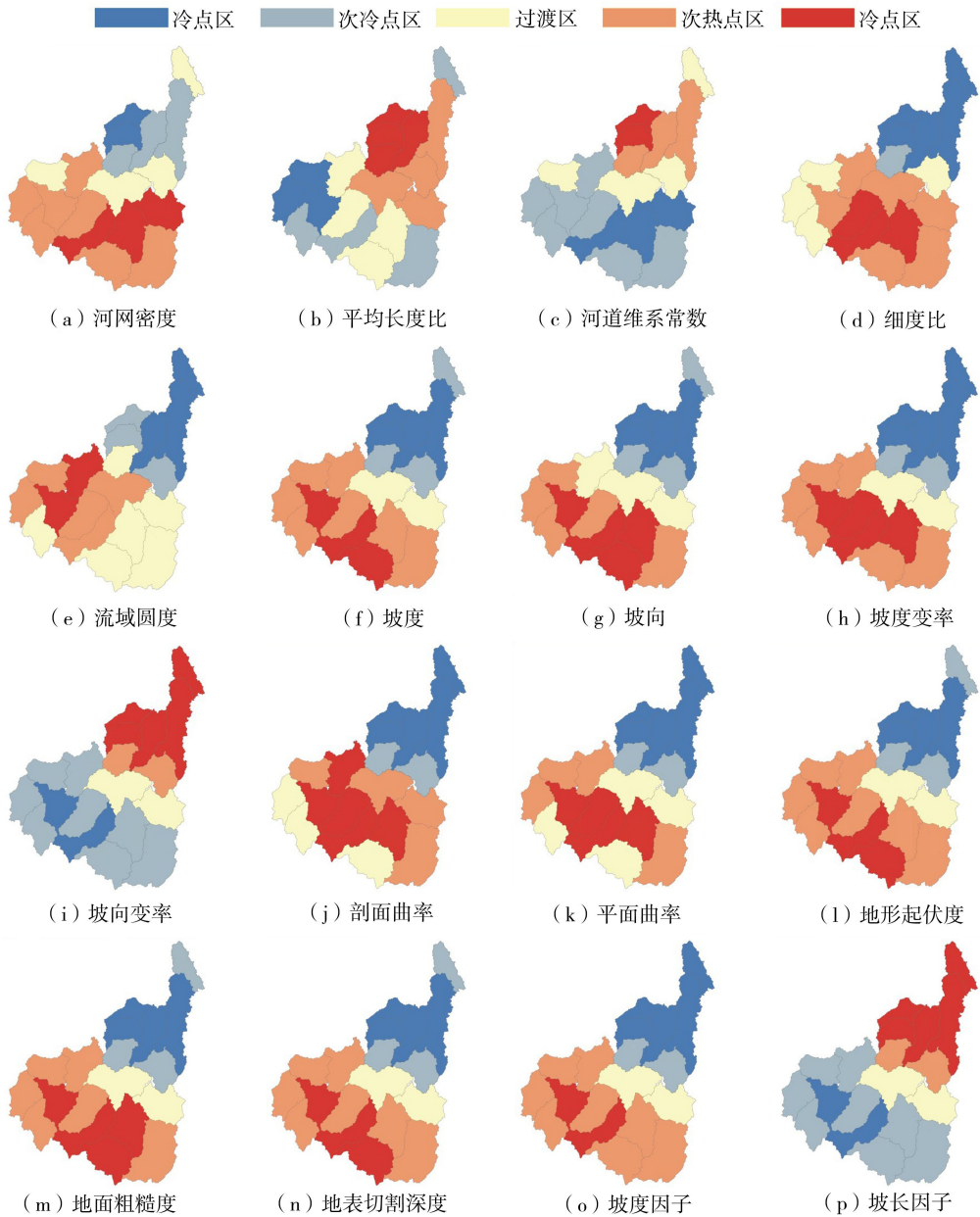


图 4 研究区水系结构及地形因子冷热点分布

Fig.4 Distribution of cold and hot spots of river system structure and topographic factors in study area

河 3 流域,表明该地河流能量大、流速快,侵蚀与输移能力强。

对于地形因子,总体来看,除坡向变率与坡长因子以外,冷热点空间分布均呈现出“北冷南热”的趋势。对于微观地形因子,冷热点集聚形式多为团块状;对于宏观地形因子,冷点区多呈团块状分布,热点区则以点状形式分布于研究区南部。对于微观地形因子,坡度、坡向、坡度变率、剖面曲率及平面曲率的冷点区域均分布在研究区北部的汲河流域和滹河 1、2、3 流域;热点区均分布在研究区南部滹河 9 和滹河 10 流域附近。坡向变率的冷热点分布与之相反,冷点区分布在研究区南部滹河 9 及史河 3 流域;热点区集中于北部汲河及滹河 1、2、3 流域。对于宏观地形因子,研究区地形起伏度、地面粗糙度、地表切割深度及坡度因子的冷点区均集中分布在北部汲河流域和滹河 2、3 流域;热点区分布在南部滹河 9 及史河 3 流域附近。而对于研究区坡长因子,冷点区呈点状分布于史河 3 及滹河 9 流域,热点区集中分布于研究区北部汲河和滹河 1、2、3 流域。

4 结 论

a. 经相关性及一元线性回归分析,研究区地形因子与水系结构特征参数之间普遍存在相关关系;其中细度比与坡度、地形起伏度、地面粗糙度及地表切割深度均呈显著的正相关关系,且与地面粗糙度的相关系数最高,为 0.658。

b. 通过对地形因子与水系结构特征参数进行多元线性回归分析,得到 5 个优度较好的模型。其中,剖面曲率及地面粗糙度可在泥沙输移层面对细度比进行定量预测;坡度变率及坡向可在汇流层面对河道维系常数进行定量预测;地面粗糙度及坡度坡长因子可在水系发育层面对分形维数进行定量预测;地面粗糙度及高程变异系数可在流域侵蚀切割层面对平均长度比进行定量预测;平面曲率、地面粗糙度及坡度坡长因子可在影响径流过程层面对流域圆度进行定量预测。

c. 通过对研究区的全局 Moran’s I 指数进行分析,发现水系结构特征参数中河网密度、平均长度比、河道维系常数、细度比及流域圆度存在较强的空间自相关性,其中细度比的集聚程度最强;地形因子中除曲率、高程变异系数及坡度坡长因子外,其余地形因子均呈现出较强的空间集聚特性。

d. 通过冷热点分析,发现水系结构特征参数中平均长度比及河道维系常数呈现出“北热南冷”的趋势;河网密度、细度比及流域圆度则由北部冷点区向南部热点区过度。地形因子中除坡向变率及坡长

因子呈现“北热南冷”的趋势外,其余指标均呈现出“北冷南热”的趋势。

参考文献:

[1] 白希选,严翼. 武陵山区地形起伏度特征及其与土地利用的变化关系[J]. 武汉工程大学学报,2020,42(1): 73-78. (BAI Xixuan, YAN Yi. Characteristics of topographic relief amplitude and its relationship with land use change in Wuling mountainous area[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology,2020,42(1):73-78. (in Chinese))

[2] 芮孝芳,蒋成煜. 流域水文与地貌特征关系研究的回顾与展望[J]. 水科学进展,2010,21(4):444-449. (RUI Xiaofang,JIANG Chengyu. Review of research of hydro-geomorphological processes interaction[J]. Advances in Water Science,2010,21(4):444-449. (in Chinese))

[3] KRAMER S, MARDER M. Evolution of river networks [J]. Physical Review Letters,1992,68(2):205-208.

[4] JENSON K, DOMINGUE O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic system analysis [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,1988,54(11):1593-1600.

[5] 闰国年,钱亚东,陈钟明. 基于栅格数字高程模型提取特征地貌技术研究[J]. 地理学报,1998(6):84-91. (LYU Guonian, QIAN Yadong, CHEN Zhongming. Automated extraction of the characteristics of topography from grid digital elevation data [J]. Acta Geographica Sinica, 1998(6): 84-91. (in Chinese))

[6] 黄诗峰,徐美,陈德清. GIS 支持下的河网密度提取及其在洪水危险性分析中的应用[J]. 自然灾害学报,2001(4): 129-132. (HUANG Shifeng, XU Mei, CHEN Deqing. GIS-based extraction of drainage network density and it’s application to flood hazard analysis[J]. Journal of Natural Disasters, 2001(4): 129-132. (in Chinese))

[7] 张冬冬,戴明龙,陈玺,等. 荆江河段地形变化对洞庭湖水文情势的影响[J]. 水资源保护,2022,38(6):71-80. (ZHANG Dongdong, DAI Minglong, CHEN Xi, et al. Influences of topographical change of Jingjiang reach on hydrological situation of Dongting Lake [J]. Water Resources Protection,2022,38(6):71-80. (in Chinese))

[8] 钟子悦,余明辉,陈小齐等. 珠江三角洲河网地形和径流条件变化对潮动力格局的影响[J]. 水资源保护,2023,39(3):213-221. (ZHONG Ziyue, YU Minghui, CHEN Xiaoqi, et al. Effects of changes in river network topography and runoff on tidal dynamic pattern in Pearl River Delta [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3):213-221. (in Chinese))

[9] 谷建立,张海涛,陈家赢,等. 基于 DEM 的县域土地利用空间自相关格局分析[J]. 农业工程学报,2012,28(23): 216-224. (GU Jianli, ZHANG Haitao, CHEN

- JIANG, et al. Analysis of land use spatial autocorrelation patterns based on DEM data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (23): 216-224. (in Chinese))
- [10] FRELICH L E, REICH P B. Spatial patterns and succession in a minnesota southern-boreal forest [J]. Ecological Monographs, 1995, 65 (3): 325-346.
- [11] 张乐勤, 方宇媛. 基于空间自相关分析的安徽省水资源生态压力空间格局探析 [J]. 水资源保护, 2017, 33 (1): 24-29. (ZHANG Leqin, FANG Yuyuan. Study of spatial pattern of water resources ecological pressure in Anhui Province based on spatial autocorrelation analysis [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (1): 24-29. (in Chinese))
- [12] 张鹏岩, 耿文亮, 杨丹, 等. 黄河下游地区土地利用和生态系统服务价值的时空演变 [J]. 农业工程学报, 2020, 36 (11): 277-288. (ZHANG Pengyan, GENG Wenliang, YANG Dan, et al. Spatial-temporal evolution of land use and ecosystem service value in the lower reaches of the Yellow River Region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36 (11): 277-288. (in Chinese))
- [13] 高建, 李彤, 贾宝全, 等. 生态用地空间稳定性及其格局分析: 以咸阳市为例 [J]. 生态学报, 2022, 42 (23): 9843-9856. (GAO Jian, LI Tong, JIA Baoquan, et al. Ecological land and its spatial stability analysis: taking Xianyang City as an example [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42 (23): 9843-9856. (in Chinese))
- [14] 张金良. 构建黄河流域水网的思考 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (4): 1-5. (ZHANG Jinliang. Thoughts on construction of water network in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4): 1-5. (in Chinese))
- [15] 牛玉国, 张金鹏. 构建黄河大水网促进黄河流域生态保护和高质量发展 [J]. 水利经济, 2023, 41 (2): 1-4. (NIU Yuguo, ZHANG Jinpeng. Research on building the Yellow River's large water network and promoting the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41 (2): 1-4. (in Chinese))
- [16] 黄莹莹. 六安市旅游扶贫模式分析与优化对策 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2016.
- [17] 张宏鸣, 常毅, 杨勤, 等. 基于 SRTM 的地形因子提取方法研究 [J]. 农业机械学报, 2022, 53 (1): 205-214. (ZHANG Hongming, CHANG Yi, YANG Qinke, et al. Topographic factor extraction method based on SRTM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53 (1): 205-214. (in Chinese))
- [18] 吴媛, 李朝奎, 方军, 等. Python 辅助下的坡度提取不确定性分析 [J]. 测绘通报, 2018 (5): 41-47. (WU Nei, LI Chaokui, FANG Jun, et al. Uncertainty analysis for slope extraction based on python [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018 (5): 41-47. (in Chinese))
- [19] JAI Vaze, JIN Teng, GEORGINA Spencer. Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices [J]. Environmental Modelling and Software, 2010, 25 (10): 1086-1098.
- [20] 王尧, 蔡运龙, 潘懋. 贵州省乌江流域土壤侵蚀与地貌特征的关联分析 [J]. 水土保持通报, 2013, 33 (3): 7-12. (WANG Yao, CAI Yunlong, PAN Mao. Relationship between soil erosion and topographic characters in Wujiang river basin of Guizhou Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33 (3): 7-12. (in Chinese))
- [21] 武静, 李梦婷. 基于景观地形的小流域单元减灾调控评价研究 [J]. 风景园林, 2020, 27 (1): 110-114. (WU Jing, LI Mengting. Evaluation of risk regulation and reduction of small watershed units based on landscape topography [J]. Landscape Architecture, 2020, 27 (1): 110-114. (in Chinese))
- [22] 张桐. 基于地质基础的喀斯特槽谷分类研究 [D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2019.
- [23] 朱方方, 程金花, 王书韬, 等. 湖北低山丘陵区侵蚀泥沙颗粒特征及其与地形因子的关系 [J]. 水土保持学报, 2021, 35 (4): 27-33. (ZHU Fangfang, CHENG Jinhua, WANG Shutao, et al. Characteristics of eroded sediment particles and their relationship with topographical factors in the low mountain and hilly area of Hubei Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35 (4): 27-33. (in Chinese))
- [24] 张会平, 杨农, 张岳桥, 等. 岷江水系流域地貌特征及其构造指示意义 [J]. 第四纪研究, 2006 (1): 126-135. (ZHANG Huiping, YANG Nong, ZHANG Yueqiao, et al. Geomorphology of the minjiang drainage system (Sichuan, China) and its structural implications [J]. Quaternary Sciences, 2006 (1): 126-135. (in Chinese))
- [25] 刘辉风. 基于流域地貌特征的水系结构及河网片段化研究 [D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [26] 李晨瑞, 李发源, 马锦, 等. 黄河中游流域地貌形态特征研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33 (4): 107-112. (LI Chenrui, LI Fayuan, MA Jin, et al. The study of watershed topography characteristics in the middle reaches of the Yellow River [J]. Geography and Geo-information Science, 2017, 33 (4): 107-112. (in Chinese))
- [27] 王计平, 黄志霖, 刘洋, 等. 地貌格局与流域侵蚀产沙过程关系定量分析: 以黄河中游河龙区间为例 [J]. 地理研究, 2013, 32 (2): 275-284. (WANG Jiping, HUANG Zhilin, LIU Yang, et al. Quantitative analysis of the relationship between watershed topography and erosion-sediment processes: a case study of Hekou-Longmen section in middle Yellow River [J]. Geographical Research, 2013, 32 (2): 275-284. (in Chinese))

[28] 凡来,张大玉. 北京街区活力影响机制及空间分异特征研究:基于多尺度地理加权回归[J]. 城市规划,2022,46(5):27-37. (FAN Lai,ZHANG Dayu. Research on the influence mechanism and spatial heterogeneity characteristics of block vitality in Beijing:based on multi-scale geographically weighted regression[J]. City Planning Review,2022,46(5):27-37. (in Chinese))

[29] 牛全福,冯尊斌,党星海,等. 黄土区滑坡研究中地形因子的选取与适宜性分析[J]. 地球信息科学学报,2017,19(12):1584-1592. (NIU Quanfu,FENG Zunbin,DANG Xinghai, et al. Suitability analysis of topographic factors in loess landslide research[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19 (12): 1584-1592. (in Chinese))

[30] 刘樯漪,程维明,郭良,等. 北天山流域地貌特征及其构造活动分析[J]. 地理与地理信息科学,2017,33(4):79-85. (LIU Qiangyi,CHENG Weiming,GUO Liang, et al. Geomorphology of Northern Tianshan and its structural analysis [J]. Geography and Geo-Information Science, 2017,33(4):79-85. (in Chinese))

[31] 欧阳晓. 区域土壤侵蚀地形指标研究[D]. 西安:西北大学, 2011.

[32] 唐钰嫣,潘耀忠,范津津,等. 土地利用景观格局对城市内涝灾害风险的影响研究[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(12):1-11. (TANG Yuyan,PAN Yaozhong,FAN Jinjin, et al. The influence of landscape pattern on the risk of urban wateloggng disaster [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021,52(12):1-11. (in Chinese))

[33] 袁雯,杨凯,徐启新. 城市化对上海河网结构和功能的发育影响[J]. 长江流域资源与环境,2005(2):133-138. (YUAN Wen,YANG Kai,XU Qixin. Effect of urbanization on growth of Shanghai river function and stream structure [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2005(2):133-138. (in Chinese))

[34] 何隆华,赵宏. 水系的分形维数及其含义[J]. 地理科学,1996(2):124-128. (HE Longhua,ZHAO Hong. The fractal dimension of river networks and its interpretation [J]. Scientia Geographica Sinica, 1996 (2): 124-128. (in Chinese))

(收稿日期:2023-02-16 编辑:王芳)

(上接第85页)

[13] 丁涛,楼越平,马小兵. 滨海平原河网洪水资源利用研究[J]. 水利学报,2007(增刊1):356-359. (DING Tao,LOU Yueping,MA Xiaobing. Research on flood water resources utilization in littoral plain river networks [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007(Sup1):356-359. (in Chinese))

[14] 王宗志,刘克琳,刘友春,等. 浅水湖泊洪水资源适度开发规模优选模型[J]. 水科学进展,2020,31(6):908-916. (WANG Zongzhi,LIU Kelin,LIU Youchun, et al. Optimizing the moderate size using floodwater in a large-scale shallow lake[J]. Advance in Water Science,2020,31(6):908-916. (in Chinese))

[15] SHETKAR R V,MAHESHA A A. Tropical, seasonal river basin development through a series of vented dams [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2011,16(3):292-302.

[16] NAYAK M A,HERMAN J D,STEINSCHNEIDER S. Balancing flood risk and water supply in California: policy search integrating short-term forecast ensembles with conjunctive use [J]. Water Resources Research, 2018,54(10):7557-7576.

[17] 郭生练,熊立华,熊丰,等. 梯级水库运行期设计洪水理论和方法[J]. 水科学进展,2020,31(5):734-745. (GUO Shenglian,XIONG Lihua,XIONG Feng, et al. Theory and method of design flood in cascade reservoir operation period[J]. Advance in Water Science, 2020,31(5):734-745. (in Chinese))

[18] 李旺林,束龙仓,殷宗泽. 地下水库的概念和设计理论[J]. 水利学报,2006,37(5):613-618. (LI Wanglin,SHU Longcang,YIN Zongze. Concept and design theory of groundwater reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(5):613-618. (in Chinese))

[19] 李伟,李砚阁,龙玉桥. 地下水人工补给井研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(5):410-416. (LI Wei,LI Yange, LONG Yuqiao. A review of research on artificial groundwater recharge wells [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2013,41(5):410-416. (in Chinese))

(收稿日期:2023-04-24 编辑:王芳)